



## TRANSPORTE Y CALIDAD DEL AIRE EN MADRID

### Resultados de las mejoras de la tecnología de los vehículos y de los combustibles en la atmósfera del municipio de Madrid

**Pedro José Pérez Martínez**

Centro de Investigación del Transporte (TRANSyT), Universidad Politécnica de Madrid,  
pjperez@caminos.upm.es

**Andrés Monzón de Cáceres**

Centro de Investigación del Transporte (TRANSyT), Universidad Politécnica de Madrid,  
amonzon@caminos.upm.es

Recibido: 3 de febrero de 2010

Aceptado: 28 de abril de 2011

### RESUMEN

El trabajo demuestra que las concentraciones de óxido de azufre y monóxido de carbono han disminuido como consecuencia de los incrementos de la calidad de los combustibles y de las normas de emisión de los vehículos desarrollados durante el periodo de estudio. Sin embargo, las concentraciones de los óxidos de nitrógeno, partículas materiales y ozono se han mantenido constantes pese a la mejora de las emisiones por vehículo, como consecuencia del aumento de la movilidad. Además, las concentraciones de los óxidos de nitrógeno y partículas materiales se encuentran por encima de los estándares de emisión permitidos.

**Palabras clave:** Contaminantes atmosféricos, análisis de tendencias, estándares de emisión.

### ABSTRACT

This paper shows that the concentrations of sulfur dioxide and carbon monoxide have decreased due to the increment of the quality of fuels and more preventive vehicle emission standards developed during the study period. However, the concentrations of nitrogen oxides, particle matter and ozone have been kept despite the improvement of the unit vehicle emissions, due to the increment of transport mobility. Therefore, the concentrations of nitrogen oxides and particle matter are above the emission standards allowed

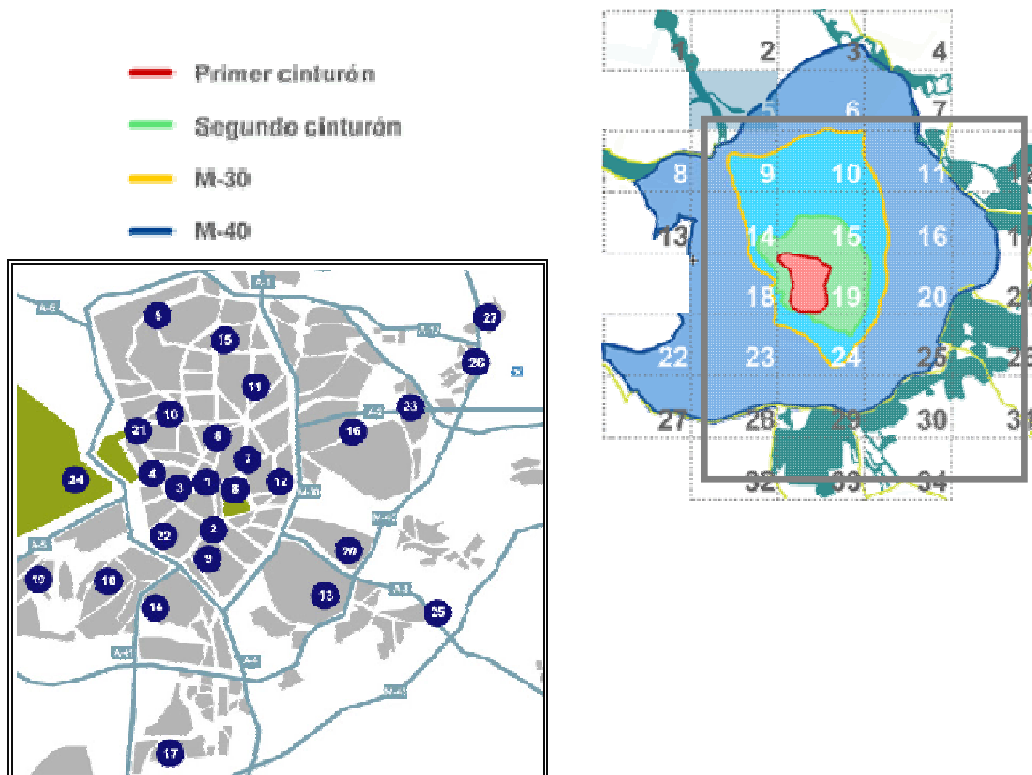
**Keywords:** Atmospheric pollution, trend analysis, emission standards.

## 1. INTRODUCCIÓN

La Unión Europea ha venido regulando, en los últimos años, los factores de emisión de los vehículos y las especificaciones de la calidad de los combustibles. Como consecuencia de esto, las tecnologías de los motores y combustibles han mejorado considerablemente para cumplir las normas impuestas. Así, municipios como Madrid han incentivado el cambio de combustible y tecnología en ciertas flotas de vehículos (i.e. transporte público en autobuses urbanos). En este sentido, este artículo estudia la posible influencia de las mejoras tecnológicas de vehículos y combustibles en la calidad del aire de Madrid a un nivel micro, mediante el análisis de las tendencias de ciertos contaminantes atmosféricos recogidos en las estaciones de control durante los últimos años. Estas estaciones de calidad del aire se encuentran distribuidas a lo largo y ancho del municipio de Madrid con el fin de estimar las variaciones espaciales y temporales de las concentraciones de los contaminantes fundamentales. La figura 1 presenta la distribución de las 27 estaciones de registro de la calidad del aire en el contexto de las zonas de tráfico de Madrid: primer y segundo cinturón, autopista M-30 y M-40.

El artículo comienza describiendo las características del Municipio de Madrid relacionadas con el tráfico de vehículos en superficie y posibles implicaciones en la calidad del aire. A continuación, se hace una revisión de la legislación europea de estándares de emisión de vehículos nuevos y calidad de combustibles y se estudia cómo ha podido influir la tecnología en la calidad del aire de Madrid. Por último, se analizan las tendencias de las concentraciones atmosféricas de los principales contaminantes en el periodo 1997-2006 a partir de los datos de las estaciones. Se comprueba que debido a las nuevas normas de emisión de los vehículos se han reducido considerablemente los niveles en el aire de monóxido de carbono (CO) y óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>). Sin embargo, las concentraciones de los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y partículas materiales (PM) no se han reducido, como consecuencia del aumento de la movilidad en superficie, y se encuentran por encima de los estándares de emisión permitidos.

**Figura 1:** Zonas de tráfico del municipio Madrid y Red del sistema integral de Vigilancia de la Calidad del Aire (RVCA).



Fuente: Ayuntamiento de Madrid (2008)

## 2. MUNICIPIO DE MADRID

Madrid tuvo una población de 3,13 millones en 2006 en un área que se extiende 605,8 km<sup>2</sup>. Esta población estuvo suficientemente abastecida por un sistema de transporte público constituido por 2.022 autobuses urbanos y 1.825 coches ferroviarios (Ministerio de Medio Ambiente, 2006). Este transporte público se vio ampliado por el uso del transporte privado. Así, el índice de motorización en 2006 fue de 523 vehículos/1.000 habitante y el parque ascendió a 1,64 millones de vehículos (Ayuntamiento de Madrid, 2008), que contribuyeron a multiplicar las emisiones de contaminantes atmosféricos considerablemente. En 2006, se contabilizaron un total de 32,6 millones de vehículos kilómetro (10<sup>6</sup> veh-km), circulando a diario por el viario del municipio (1.255 km), en el conjunto de las 1.820 calles y 3.666 tramos de Madrid (tabla 1). Este tráfico correspondió en su gran mayoría al transporte privado de viajeros (81%). El transporte público únicamente significó un 12% del transporte diario en superficie (2% autobuses y 10% taxis) y los camiones de transporte de mercancías un 7%.

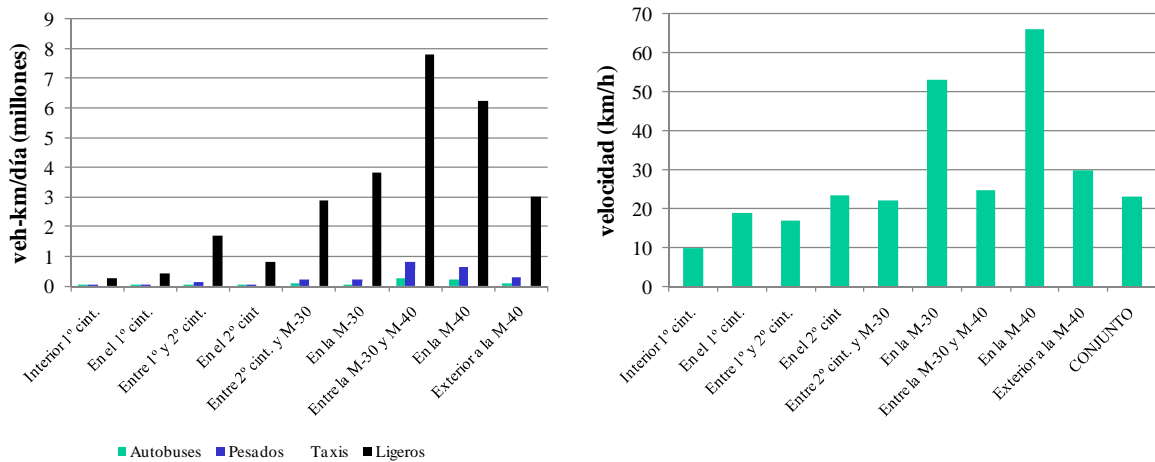
La velocidad media de circulación del municipio fue de 23,2 km/h en 2006 (Ayuntamiento de Madrid, 2008). Esta velocidad es una aproximación de las emisiones del transporte al estar relacionada fuertemente con los consumos y factores de emisión unitarios. Así, la figura 2 muestra como queda distribuida los tráficos medios diarios, y velocidades de circulación asociadas, según las zonas de control de tráfico de Madrid. Existe una correspondencia entre volúmenes altos de tráfico, velocidades altas de circulación y factores de emisión unitarios bajos. De la misma forma, en el interior del municipio (primer y segundo cinturón) y en el espacio entre las autopistas el tráfico es menor al igual que las velocidades de circulación (para unos factores de emisión y consumos unitarios elevados).

En ausencia de otras fuentes importantes de emisiones como la industria, la mayoría de las emisiones de NO<sub>x</sub> y partículas materiales menores de diez micras (PM<sub>10</sub>) son debidas al transporte. Así, las emisiones de 6 contaminantes principales – Benceno (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>), CO, NO<sub>x</sub>, ozono (O<sub>3</sub>), PM<sub>10</sub> y dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) – procedentes mayormente del transporte fueron estimadas en 287 toneladas/día en 2006 (Ayuntamiento de Madrid, 2008).

**Figura 2:** Distribución del tráfico diario medio y velocidades de circulación asociadas en el municipio de Madrid según zonas. Fuente: Ayuntamiento de Madrid (2008)

Número de:		Ámbito	Ubicación		Datos		IMD (veh/día)
Calles	Tramos		Zona	Distrito	Longitud (10 <sup>3</sup> m)	Demanda (veh-km/día)	
154	223	Interior 1º cint.	0	T O D O S	40.795	38.8015	9.511
27	58	En el 1º cint.	10		15.870	56.1380	35.374
195	541	Entre 1º y 2º cint.	12		139.585	222.3788	15.931
39	124	En el 2º cint.	20		33.330	982.259	29.471
408	845	Entre 2º cint. y M-30	23		238.410	3.545.120	14.870
13	44	En la M-30	30		36.710	4.182.671	113.938
807	1.546	Entre la M-30 y M-40	34		558.085	9.472.548	16.973
2	21	En la M-40	40		46.550	7.553.970	162.276
175	264	Exterior a la M-40	45		146.080	3.674.510	25.154
<b>1.820</b>	<b>3.666</b>	<b>CONJUNTO</b>			<b>1.255.415</b>	<b>32.594.262</b>	<b>25.963</b>

**Tabla 1 :** Datos de calles y tramos aforados en Madrid según zonas, año 2006. Fuente: Ayuntamiento de Madrid (2008)



### 3. REGULACIONES DE LAS EMISIONES Y MEJORA DE LOS COMBUSTIBLES

Las normas de emisión europeas Euro fueron introducidas en 1993 (Euro I). De esta forma, las normas de emisión de los vehículos nuevos registrados después del 1 de enero de 1996, 2001 y 2005 fueron las equivalentes a los estándares de emisión Euro II, III y IV (Berg, 2003). Así, la catálisis de oxidación y la gasolina sin plomo fueron introducidas en 1996 para el control de las emisiones de los coches de gasolina (estándares Euro II), reduciendo las emisiones de CO por kilómetro considerablemente (IPCC, 2004). Después del año 2000 se introdujeron los convertidores catalíticos de tres vías en los coches (Euro III), ayudando a reducir las emisiones de CO aún más. Por último y desde 2005, los estándares europeos de emisión resultan más limitantes (Euro IV) y los coeficientes de emisión específicos en España, tanto para vehículos de gasolina como de gasóleo, se han reducido considerablemente.

De acuerdo con los estándares europeos de emisión Euro IV, a los coches nuevos de gasolina sólo se les permite emitir 0.1 g/km de compuestos orgánicos volátiles sin metano (COVNM), 0.08 g/km (NO<sub>x</sub>) y 1.0 g/km (CO). Similarmente, a los coches nuevos de gasóleo se les permite emitir únicamente 0.05 g/km (COVNM), 0.25 g/km (NO<sub>x</sub>), 0.5 g/km (CO) y 0.025 g/km (PM). De la misma forma y de acuerdo con la Comisión Europea, los estándares de emisión de los camiones nuevos se han reducido un 88% (entre 1982 y 2007), 95% (1982-2007), 97% (1982-2007) y 98% (1992-2007) para CO, COVNM, NO<sub>x</sub> y PM, respectivamente (Berg, 2003). Sin embargo, las emisiones totales de NO<sub>x</sub> y PM han aumentado con el aumento del consumo total de gasóleo.

La edad del parque de los vehículos es una estimación de los factores de emisión de los contaminantes atmosféricos; así la edad de los vehículos de gasóleo es de unos 5 años, inferior a la edad del parque de vehículos de gasolina (8.5 años). Por consiguiente, hay un mayor margen de mejora de las emisiones de contaminantes atmosféricos por motivos tecnológicos en los vehículos de gasolina que en los de gasóleo, como consecuencia de la renovación del parque de estos últimos.

El contenido en plomo de las gasolinas se ha reducido al máximo (<0,013 g/l), puesto que las nuevas tecnologías Euro necesitan convertidores catalíticos y sensores de

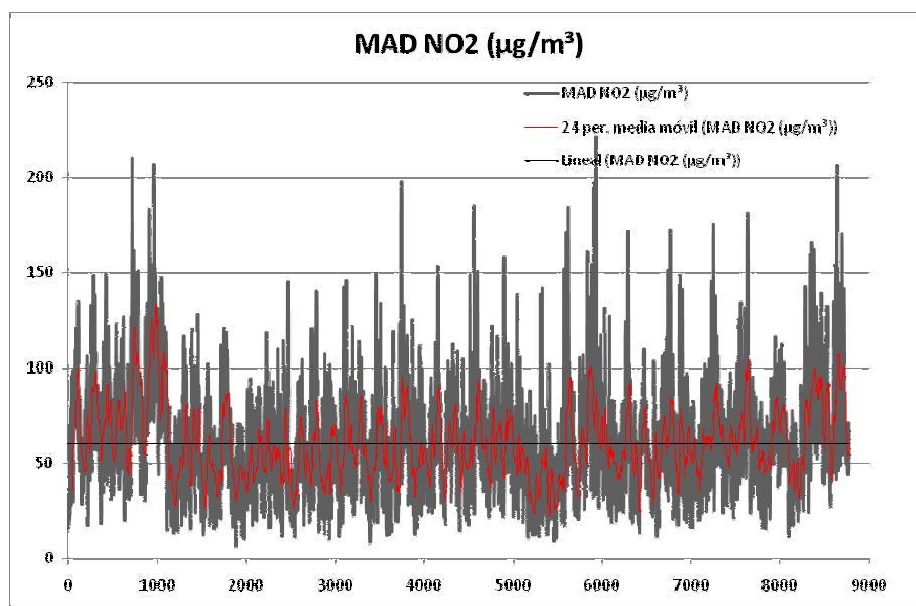
oxígeno que utilizan gasolinas sin plomo. El contenido en azufre también se ha reducido del 0,2% al 0,05% (máximo en 2003) (Gruden, 2003).

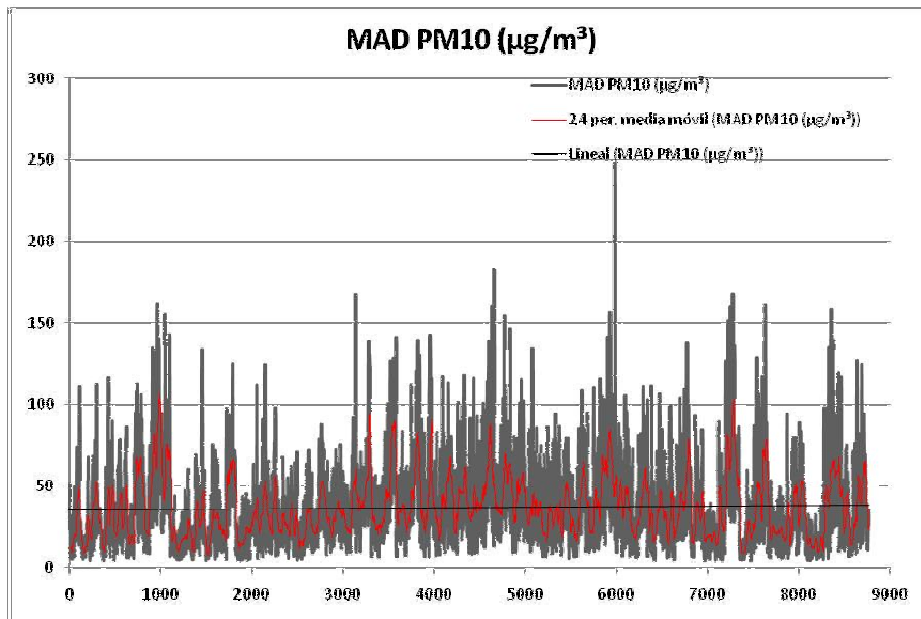
#### 4. TENDENCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE EN MADRID Y LEGISLACIÓN

El Ayuntamiento de Madrid dispone de una red de vigilancia de calidad del aire (RVCA) formada por 27 estaciones. Estas estaciones muestrean los valores medios anuales de concentraciones y superaciones de contaminantes atmosféricos mediante la utilización de medidores gravimétricos de alto volumen. Estas estaciones recogen en su mayoría las emisiones de fuentes móviles, reflejando los impactos de las nuevas tecnologías de vehículos y combustibles.

La utilidad de estas estaciones es mostrar el cumplimiento de la legislación europea referida a los valores máximos admisibles de los contaminantes atmosféricos en el aire. De este modo, la figura 3 muestra la evolución de la calidad del aire en Madrid, representada por los valores horarios de las concentraciones de  $\text{NO}_2$  y  $\text{PM}_{10}$ . En el conjunto de las 27 estaciones integrantes de la RVCA, se registraron unas concentraciones medias horarias de 60.6 microgramos por metro cúbico ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) para el dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) y 37  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para  $\text{PM}_{10}$ . En 2006 se superó el valor límite anual para la protección de la salud humana de las medias horarias de  $\text{NO}_2$  (48  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , Real Decreto 1073/2002) y se estuvo próximo a superar el valor límite anual de  $\text{PM}_{10}$  (40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , Real Decreto 1073/2002). También según el Real Decreto 1073/2002, el valor límite horario para la protección de la salud humana, 240  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ( $\text{NO}_2$ ) y 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ( $\text{PM}_{10}$ ), no debía superarse más de 18 y 35 ocasiones al año respectivamente. En el caso de  $\text{NO}_2$  no se superó este límite en ninguna ocasión, contrariamente en  $\text{PM}_{10}$ , donde la concentración límite se superó 70 veces en 2006. Anteriormente al Real Decreto 1073/2002, el Real Decreto 717/1987 establecía el valor límite anual de  $\text{NO}_2$  para la protección de la salud humana, percentil 98 de las medias horarias del año, en 200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . En el conjunto de la RVCA de Madrid, el percentil 98 de los valores medios horarios del año 2006 estuvo por debajo del percentil legislado (134  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

**Figura 3:** Concentraciones medias horarias de los contaminantes atmosféricos  $\text{NO}_2$  y  $\text{PM}_{10}$  en el aire de Madrid, año 2006.





**Fuente:** Dirección General Sostenibilidad y Agenda 21, Ayuntamiento Madrid (2008).

**Nota:** datos calculados a partir de la media de 27 estaciones de la Red de Vigilancia de la Calidad del Aire (RVCA) de Madrid (figura 1). Fuente: Ayuntamiento de Madrid (2008) y elaboración propia (2011)

Los cambios en la composición del parque de vehículos deberían reflejarse en los valores de la calidad del aire muestreados. En 2006, la edad media de los camiones, autobuses, turismos y motocicletas en Madrid era de 6,44, 6,31, 5,94 y 5,26 años respectivamente<sup>2</sup>. Aunque la flota de vehículos operativos en el viario del municipio era relativamente nueva, el volumen de tráfico fue tan abultado que los límites de contaminantes como NO<sub>2</sub> y PM<sub>10</sub> resultaban preocupantes y los umbrales permitidos por la legislación pertinente superados.

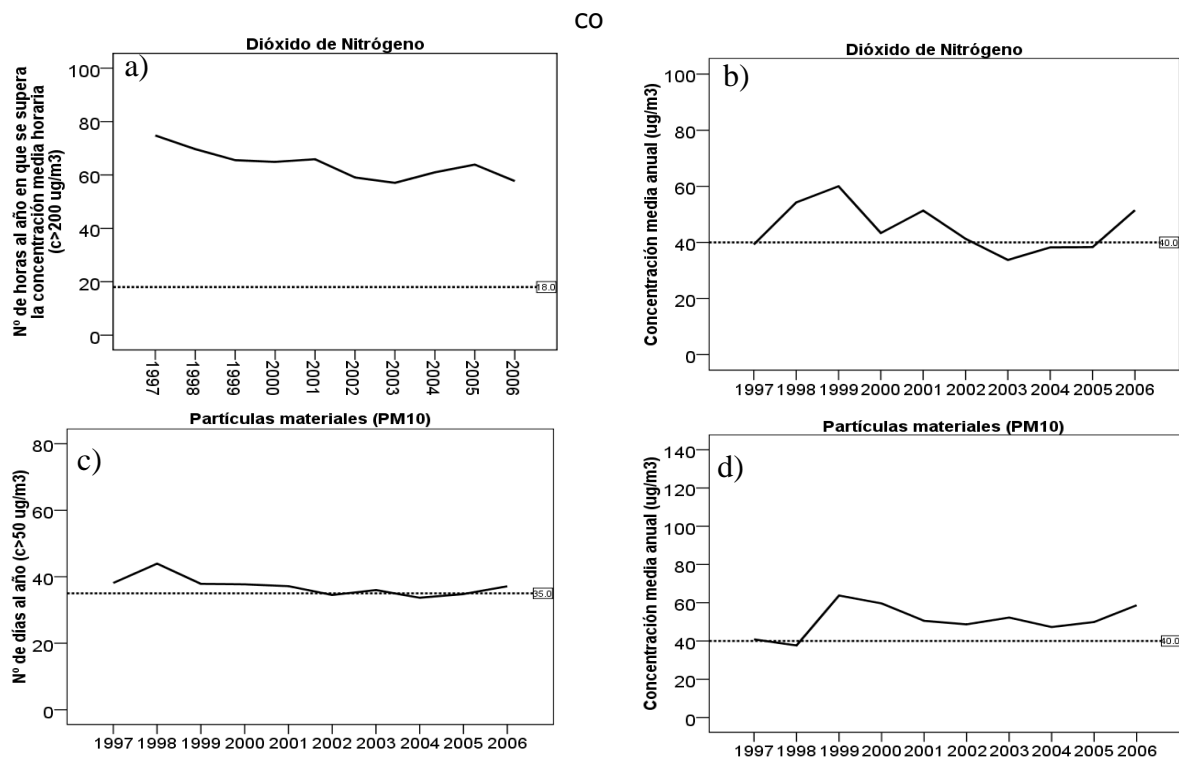
## 5. METODOLOGÍA EMPLEADA Y RESULTADOS

Las concentraciones y superaciones medias anuales de cinco contaminantes atmosféricos – NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub> y CO – fueron obtenidas de la RVCA para el periodo 1997-2006 en sus estaciones más significativas. Los valores corresponden a los años en donde más efecto ha tenido las directivas europeas de emisiones y combustibles. Un análisis de varianza de un factor fue realizado utilizando las medias anuales para los cinco contaminantes para comprobar la hipótesis de que los niveles de contaminación en cada año son menores a los del año precedente. Las excedencias de los contaminantes respecto a los valores establecidos por las directivas son también analizadas.

La figura 4 muestra las tendencias del número de superaciones y de las concentraciones de NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> para el periodo 1997-2006. La tabla 2 presenta los resultados del análisis de varianza: la estadística *F* es significativa (con un nivel de confianza de 0,05) para las concentraciones de SO<sub>2</sub> y CO (tendencia decreciente) y para las superaciones de O<sub>3</sub> (tendencia creciente) indicando que existen diferencias entre los valores de los 10 años estudiados. Para el caso del NO<sub>2</sub> y PM<sub>10</sub>, concentraciones y

superaciones, y para las concentraciones de  $O_3$ , las diferencias en los valores anuales no son significativas. Estas tendencias indican que ha habido una mejora en la calidad del aire en términos de  $SO_2$  y  $CO$ . No así en términos de  $NO_2$ ,  $PM_{10}$  y  $O_3$ , donde ha habido un estancamiento. Estas tendencias validan las tendencias recogidas en otros estudios (Pérez-Martínez, 2007; Observatorio de la Sostenibilidad en España, 2007). Especialmente destacan las superaciones de  $NO_2$ , las cuales están muy por encima de los niveles marcados por las directivas europeas. Los contaminantes  $SO_2$ ,  $O_3$  y  $CO$  se encuentran muy por debajo de los estándares de emisión.

**Figura 4:** Superaciones anuales del valor límite horario de  $NO_2$  ( $200 \mu g/m^3$ ) (a), concentración media anual de  $NO_2$  (b), superaciones anuales del valor límite diario de  $PM_{10}$  ( $50 \mu g/m^3$ ) (c) y concentración media anual de  $PM_{10}$  (d). Líneas horizontales de referencia: valor límite de  $NO_2$  (18 superaciones y  $c=40 \mu g/m^3$ ) y valor límite de  $PM_{10}$  (35 superaciones y  $c=40 \mu g/m^3$ ).



**Fuente:** Ministerio de Medio Ambiente (2006) y elaboración propia (2011)

Año	n	Media	Desviación	ANOVA
Superaciones anuales del valor límite horario de NO <sub>2</sub> (200 µg/m <sup>3</sup> )				
1997	5	74,8	10,7	F(9,98)=1,674 p=0,073
2006	8	57,7	15,5	
Concentración media anual de NO <sub>2</sub>				
1997	10	39,3	38,4	F(9,206)=1,532 p=0,102
2006	15	54,9	34,7	
Superaciones anuales del valor límite horario de PM <sub>10</sub> (50 µg/m <sup>3</sup> )				
1997	6	38,1	18,8	F(9,86)=1,450 p=0,180
2006	8	37,1	5,7	
Concentración media anual de PM <sub>10</sub>				
1997	12	40,8	25,8	F(9,182)=1,659 p=0,102
2006	16	58,7	35,2	
Superaciones anuales del máximo de las medias octohorarias de O <sub>3</sub> (120 µg/m <sup>3</sup> )				
1997	2	3,5	3,5	F(9,139)=8,231 p<0,0001
2006	24	5,1	8,3	
Concentración media anual de O <sub>3</sub>				
1997	4	22,2	19,6	F(9,379)=0,623 p=0,809
2006	24	26,3	13,9	
Concentración media anual de SO <sub>2</sub>				
1997	12	24,5	12,6	F(9,218)=25,795 p<0,0001
2006	16	11,3	3,5	
Concentración media anual de CO				
1997	12	6,5	9,3	F(9,335)=74,30 p<0,0001
2006	24	0.7	0.2	

**Tabla 2:** Resumen de los resultados del procedimiento ANOVA. Fuente: Ministerio de Medio Ambiente (2006) y elaboración propia (2011)

## 6. CONCLUSIONES

- La revisión de las tendencias de los principales contaminantes muestran que las mejoras en la tecnología de vehículos y combustibles han influido en la calidad del aire en términos de concentraciones de SO<sub>2</sub> y CO y han estabilizado las concentraciones de NO<sub>2</sub> y PM<sub>10</sub>, pese a los incrementos de la motorización y de la movilidad privada. Sin embargo, los niveles de NO<sub>2</sub> y PM<sub>10</sub> siguen estando por encima de los niveles permisibles.
- Con un aumento estimado en la demanda del transporte en 2012 del 19% desde los 32,57 millones de vehículos km por día en 2006, las cargas de emisiones en 2012, donde puede no haber mayores mejoras en la tecnología de vehículos y combustibles, podrían estabilizarse e incluso reducirse respecto a los niveles de 2006. Esto se debería en gran parte a la renovación total del parque pese al aumento del tráfico rodado hasta los 38,91 millones de vehículos km.



## REFERENCIAS

- Ayuntamiento de Madrid, "Informe sobre la calidad del aire en Madrid", Área de Gobierno de Medio Ambiente, Seguridad y Servicios a la Comunidad, (2008).
- BERG W., "Legislation for the reduction of exhaust gas emissions", en: D. Gruden (ed), Traffic and environment, The handbook of environmental chemistry vol. 3 part T, 175-253, Springer, Berlin Heidelberg, (2003).
- GRUDEN D., "Fuels", en: D. GRUDEN (ed), Traffic and environment, The handbook of environmental chemistry vol. 3 part T, 255-258, Springer, Berlin Heidelberg, (2003).
- IPCC, "Greenhouse Gas Inventory Reference Manual: IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories", U.K: Bracknell, (1995).
- Ministerio de Medio Ambiente, "Observatorio de la movilidad Metropolitana", (2006).
- Observatorio de la sostenibilidad en España, "Calidad del aire en las ciudades. Clave de sostenibilidad urbana", Universidad de Alcalá de Henares, (2007).
- PÉREZ-MARTÍNEZ P.J., "Mobility and environment in Spain", en: G. Morrison y S. RAUCH (eds.), Highway and Urban Environment, Proceedings of the 8th Highway and Urban Environment Symposium, 35-43, Springer, Dordrecht, (2007).